人类背包负重步行能量消耗计算模型研究

王震[1],李俊[2],赵明珠[3],李长振[3]

(1.广东青年职业学院,510550 广州;2.无锡太湖学院,214064 无锡;3.广州城市职业学院,510405 广州)

摘 要:依据背包负重步行能量消耗相关参数的试验结果,建立数学模型计算能耗,验证其模型的正确性,并探讨背包负重参数对人类步行能量消耗的影响。采用双质量-弹簧模型,类似于人类背包负重行走模型,构建模型运动学方程。结果表明,弹性背包固有频率低于步行共振频率时,能量消耗显著减少;弹性背包能量消耗与人体共振频率附近时增加,且在较高速度或较大负重时更加显著;人体垂直方向位移、相位差以及不同背包参数的净机械功模型计算结果与试验结果基本一致。适宜的弹性背包能有效地减少阻尼、大负重、快速步行时的能量消耗;双质量-弹簧模型计算背包负重行走能耗与试验结果基本吻合,说明该模型建模方法合理,可用于人体背包负重行走能量消耗的预测。

关键词:背包;步行;能量消耗;计算模型

中图分类号:G804.7　　　**文献标志码:**A

The calculation model of the walking energy expenditure of human body backpack

WANG Zhen[1],LI Jun[2],ZHAO Mingzhu[3],LI Changzhen[3]

(1. Guangdong Youth Vocational College,510550 Guangzhou,China;
2. Wuxi Taihu University,214064 Wuxi,China;3. Guangzhou City Polytechnic,510405 Guangzhou,China)

Abstract: Based on the experimental results of the parameters related to the energy expenditure of backpack weight-bearing walking, this paper establishes a mathematical model to calculate energy consumption, verifies the correctness of its model, and discusses the effect of backpack weight-bearing parameters on the energy expenditure of human walking. A dual-mass-spring model, similar to the human body backpack weight-bearing walking model, was used to construct the model kinematic equation. Results show that when the natural frequency of elastic backpack is lower than the walking resonance frequency, energy expenditure is significantly reduced. The energy expenditure of the elastic backpack increases near the resonance frequency of the human body and is more significant at a higher speed or greater weight-bearing. The calculated results of the net mechanical work model of the vertical displacement, phase difference and different backpack parameters of the human body are basically consistent with the experimental results.

收稿日期:2021-01-28　　　**修回日期:**2022-02-22

基金项目:广东省哲学社会科学规划项目(No. GD20CTY08);广东省教育科学"十三五"规划项目(No. 2020GXJK516);广东省"攀登计划"重点项目专项资金(No. pdjh2020a11092)

通信作者:李长振,讲师。E-mail:lichangzhenno1@163.com

引用格式:王震,李俊,赵明珠,等.人类背包负重步行能量消耗计算模型研究[J].应用力学学报,2022,39(2):255-261.
WANG Zhen,LI Jun,ZHAO Mingzhu,et al. The calculation model of the walking energy expenditure of human body backpack[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):255-261.

Appropriate elastic backpack can effectively reduce energy expenditure during damping, heavy load and rapid walking. The calculation of backpack weight-bearing walking energy consumption by double mass-spring model is basically consistent with the experimental results, indicating that the modeling method of this model is reasonable and can be used to predict energy expenditure of human body backpack weight-bearing walking.

Key words: backpack; walking; energy expenditure; computational model

现代交通工具越来越方便,但人们外出携带背包负重仍不可缺少,譬如学生、士兵或徒步旅行者。背包负重出行能量消耗是人们考虑的主要因素,因此,如何选择合适的背包减少能耗是人们优先考虑的[1]。人体背包负重的能量消耗受多种因素的影响,包括刚度、阻尼、负重量及负重量分布和行走(或跑步)速度等[2]。近年来有人研究[1,3]弹性背包负重可以降低行走的能量消耗,同时降低背包与人体之间的相互作用力、关节力和潜在受伤风险,适宜的弹性背包比刚性连接背包能量消耗降低了 6.2%。在负重行走期间,发现弹性链接比刚性链接节省能量[4]。一条腿机器人携带弹性背包负重时能量消耗更少[5]。然而,Foissac 等[6]发现以速度为 5.2 km/h 和 6 km/h 行走时,弹性背包比刚性背包消耗能量多。Ren 等[3]对不同刚度背包进行了模拟,发现背包的刚度和阻尼对人体运动能耗几乎没有影响。有研究表明,与刚性连接负重背包相比,弹性背包连接负重背包接近步行共振频率,对步行能量消耗几乎没有影响。

文献[1,6]采用双自由度模型计算之前研究能量消耗存在的争议。发力腿每一步的净机械功可看作是能量消耗的间接指标,使用文献[1,6]研究的参数,携带弹性背包与刚性背包相比,净机械功增加和降低都超过 60%。然而,在之前的试验中发现携带不同刚度的背包能量差异小于 10%,仍然缺乏一种能够准确估算弹性悬挂负重能量消耗的方法。本研究把人体携带背包负重行走看做双质量-弹簧模型[7],计算不同背包负重参数对步行能量消耗差异的影响。

1 方　法

1.1 能耗计算模型建立运动方程的条件

背包与人体在垂直方向的夹角很小,能耗数学计算模型仅考虑垂直方向[8],垂直方向能量消耗是最重要的部分[9]。背包负重、身体质量和腿看作双质量-弹簧模型[4,10],该模型通过腿长(弹簧)与地面接触且在垂直方向振动,计算人体背包负重步行的能量消耗。双质量-弹簧模型如图 1 所示[4]。

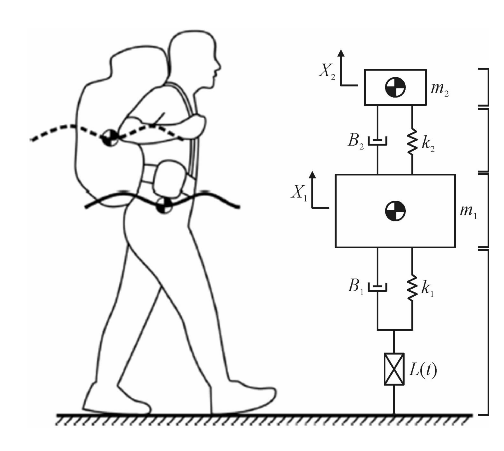


图 1　人体背包负重双质量-弹簧计算模型

Fig. 1　Double mass-spring calculation model of human body backpack loading

依据文献[4]研究,背包负重 m_2 和人体质量 m_1 之间的连接看作是阻尼 B_2 和弹簧 k_2。人体质量 m_1 与动力源 $L(t)$ 之间的连接看作阻尼 B_1 和弹簧 k_1,腿部肌肉收缩产生的能量看作动力源 $L(t)$。动力源 $L(t)$ 与地面相接触,其运动方程为

$$m_1\ddot{X}_1+(B_1+B_2)_1\dot{X}_1-B_2\dot{X}_2+(k_1+k_2)X_1-k_2X_2=B_1\dot{L}(t)+k_1L(t) \tag{1}$$

$$m_2\ddot{X}_2+B_2\dot{X}_2-B_2\dot{X}_1+k_2X_2-k_2X_1=0 \tag{2}$$

1.2 计算模型的动力源与质心频率方程

人体行走时,质心的固定振幅和频率在垂直方向的运动与正弦曲线相似[11]。在双质量-弹簧模型中,正弦曲线函数 $L(t)=A\sin(\omega_f t)$ 表示腿长,近似于人体质心在垂直方向的位移。人体行走过程中质心频率 ω_f(rad/s)近似于行走速度 v(m/s)和高度 S(m)的函数[12]。其函数为

$$\omega_f = \frac{4\pi \times 64.8\,(v/S)^{0.57}}{60} \tag{3}$$

1.3 机械功率与机械功方程

Foissac 等[6]研究确定发力腿振幅为 A,发力腿的机械功率是腿对身体质量 m_1 的反作用力和腿长变化速度 v 的乘积。其表达式为

$$F_R = k_1[X_1 - A\sin(\omega_f t)] + B_1[\dot{X}_1 - \omega_f A\cos(\omega_f t)] + (m_1 + m_2)g \tag{4}$$

$$P = F_R v = F_R \omega_f A\cos(\omega_f t) \tag{5}$$

发力腿做的净机械功等于腿和悬挂负重阻尼消耗的能量。每一步做的净机械功与人体行走消耗的能量密切相关。方程中发力腿的净机械功是瞬时功率在每一个步态周期内的积分。

$$E = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_f}} P\mathrm{d}t \tag{6}$$

1.4 背包参数值及参考标准

依据文献[1,6]的研究结果,确定刚度、阻尼、负重量和步速等有关参数见表 1 和表 2[13]。

文献[1,6]研究了弹性和悬挂背包的有效参数及参考范围。Foissac 等[6]用两种不同的方法测定悬挂负重的刚度和阻尼,采用的参数不同,其结果也不确定。本研究选用刚性背包和弹性背包参数的平均值,选择刚性背包参数平均值作为比较基准,对比悬挂负重,较好地反映了刚性悬挂背包负重的有效性。Rome 等[1]的研究中没有报道悬挂背包的参数,因此本研究假设悬挂背包的阻尼是 100 N·s/m,弹性背包阻尼采用 Foissac 报道的近似平均值。

表 1 双质量-弹簧模型参数值及参考标准

Tab. 1 Parameter values and reference standards of double-mass-spring model

参数	名称	数值
S/m	身高	1.791
m_1/kg	人体质量	74
m_2	背包质量	变量
k_2	悬挂刚度	变量
B_2	悬挂阻尼	变量
v/(km·h^{-1})	步速	变量
k_1/(kN·m^{-1})	发力腿刚[13]	28.5
B_1/(N·s·m^{-1})	发力腿阻[13]	950
ω_f	运动频率	变量
A/m	发力腿振幅	0.01
g/(m·s^{-2})	重力加速度	9.8

表 2 不同背包的刚度和阻尼值

Tab. 2 Stiffness and damping values of different backpacks

名称	刚度 k_2/(kN·m^{-1})	阻尼 B_2/(N·s·m^{-1})
刚性背包	51.877 ±1.609	48.1 ±9.5
弹性背包	5.147 ±1.59	10.4 ±2.1
悬挂背包[1]	0.530	100
刚性悬挂背包	5.060 ±0.978	320 ±125
弹性悬挂背包	3.300 ±0.564	96 ±57,或 100

2 背包试验设计

文献[1,6]试验研究对象、试验方案及数据处理如表 3 所示。

表 3 试验设计[1,6]

Tab. 3 Experimental design[1,6]

文献	试验对象和背包	试验方案	数据处理
文献[6]	①24 名男性,年龄(24.6 ±3.8)岁,体质量(74 ±9.2)kg,有背包旅游或远足履历;②背包有两条肩膀系扣带,一条腰部系扣带,另有两条提升带从背包底部到背包,长短可调控,行走时使背包紧贴人体躯干	①受试者到试验室,先熟悉跑步机背包负重行走;②试验条件:不背包,刚性背包,弹性背包;③步行速度 3.7 km/h、4.5 km/h、5.2 km/h、6 km/h,负重 25% 体质量,步行时间 3 min;④用加速度计确定步态周期参数;⑤测量最后 1 min 摄氧量、二氧化碳排出量和呼吸交换率	①双因素重复测量方差分析,4(步速)×3(背包),检验背包刚度和步速对因变量的主要影响:加速度、背包刚度和步速;②显著效应 $P=0.05$,Pearson 相关系数;③用 Bland 和 Altman 分析检查偏倚和误差不均匀性
文献[1]	①6 名学生受试者,年龄和体质量不详;②有背包步行履历;③背包基本结构同上	①试验背包:刚性背包很大程度与身体运动不耦合,通过固定设备使背包负重与身体锁定,悬挂负重背包;②步行速度和负重同上;③测试机体代谢率	①双因素重复测量方差分析;②配对样本 T 检验显著效应 $P=0.05$

3 计算结果及分析

3.1 人体背包负重在垂直方向位移与身体间的相位差

双质量-弹簧模型计算人体在垂直方向的位移与背包负重和身体之间相位差的预测与 Foissac 等[6]试验结果相似。模型计算的背包负重量和阻尼值分别为 $m_2 = 16$ kg 和 $B_2 = 100$ N · s/m,其他参数见表 1 和表 2。Foissac 等[6]试验结果如图 2 所示,本模型计算结果如图 3 所示。

由图 2 和图 3 可以看出,人体质心垂直位移和人体与背包之间的相位,双质量-弹簧模型的计算结果与文献的试验结果基本吻合。

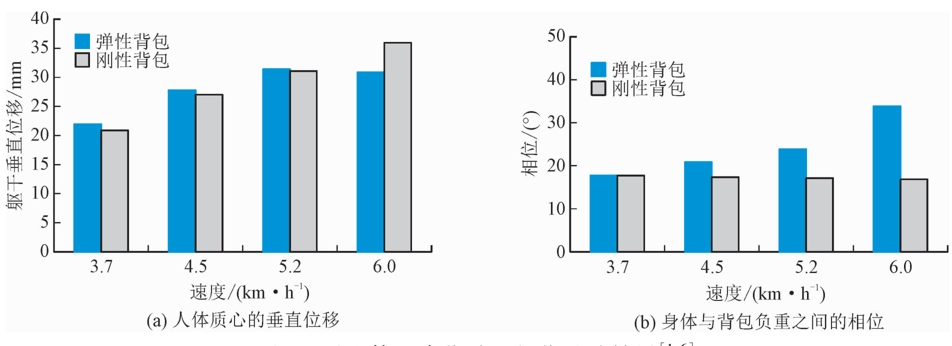


图 2 对人体垂直位移和相位试验结果[1,6]

Fig. 2 Experiment results of vertical displacement and phase of human body[1,6]

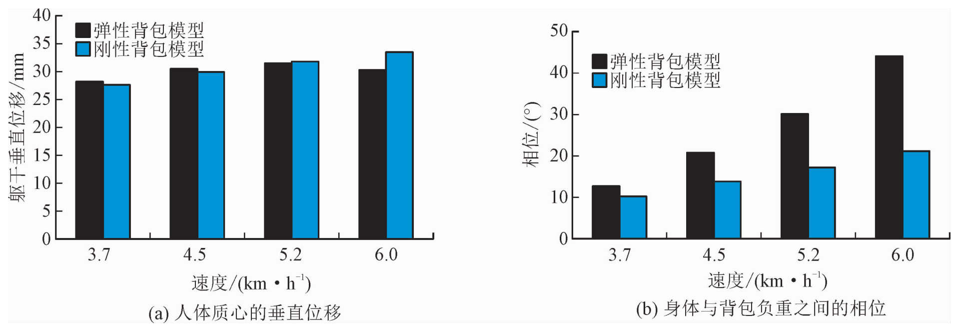


图 3 双质量-弹簧模型计算人体垂直位移和相位结果

Fig. 3 Calculation results of vertical displacement and phase of human body with double mass-spring model

3.2 不同背包净机械功

采用文献[1,6]的试验参数计算双质量-弹簧模型在不同背包负重下的净机械功。文献[6]的试验参数设置为:$m_2 = 16$ kg, $k_2 = 3.3$ kN/m, $B_2 = 100$ N·s/m, $v = 5.2$ km/h;文献[1]的试验参数设置为:$m_2 = 27$ kg, $k_2 = 530$ N/m, $B_2 = 100$ N · s/m, $v = 5.6$ km/h;其他参数设置见表 1 和表 2。本研究模型计算结果与文献[1,6]的结果对比如图 4 和图 5 所示。

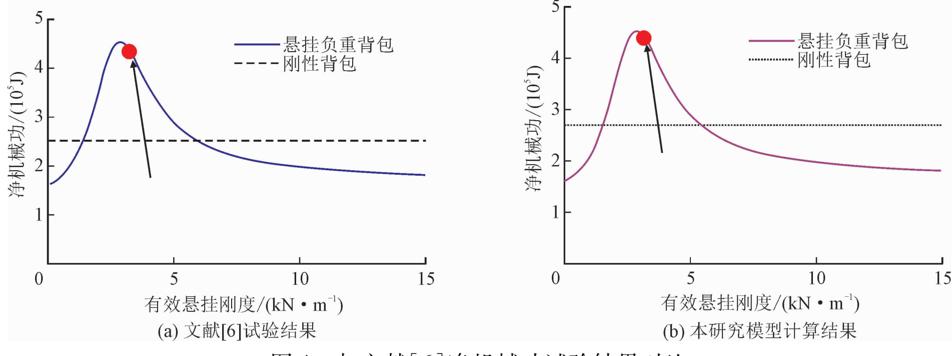


图 4 与文献[6]净机械功试验结果对比

Fig. 4 Comparison of mechanical work experimental results with Ref. [6]

由图 4 和图 5 可以看出:模型计算结果与文献试验研究结果基本吻合;文献[6]试验负重 16 kg 悬挂负重背包、步速 5.2 km/h,与刚性背包相比,动力腿增加 72% 净机械功,表明步速 5.2 km/h 时,每一

步增加的净机械功显示悬挂负重背包与刚性背包相比代谢消耗可能会增加;文献[1]试验预测,悬挂负重背包重 27 kg、步速 5.6 km/h,每一步的净机械功与刚性背包相比减少 66%,表明悬挂负重背包的代谢消耗可能减少;悬挂负重背包与刚性背包负重相比,每一步的净机械功总体变化趋势相同,如果悬挂有效刚度小,每一步消耗的净机械功可能会减少,但有效悬挂刚度大的负重有利于减少每一步的净机械功。该模型还可预测,与刚性背包相比,有效悬挂刚度大的背包负重易于减少每一步的净机械功,但当刚性背包附着在人体时,有效刚度减小,有效阻尼增加,原有的刚度有减弱[6]。

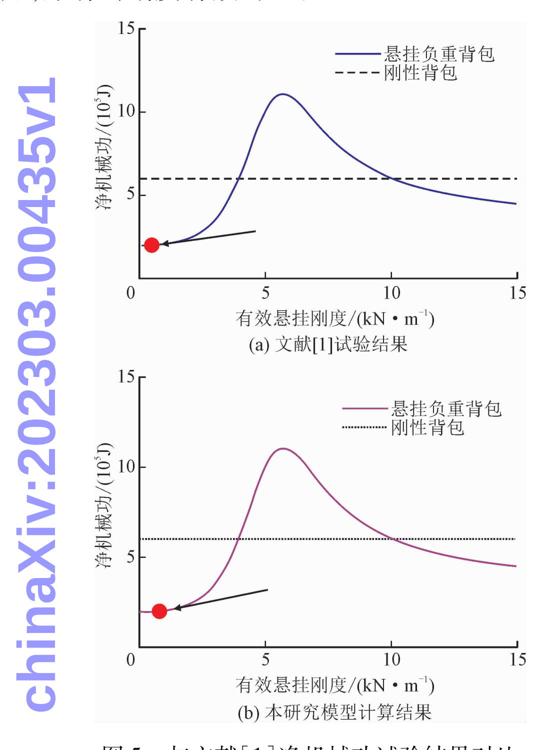


图 5 与文献[1]净机械功试验结果对比

Fig. 5 Comparison of mechanical work experimental results with Ref. [1]

3.3 不同阻尼背包净机械功

$m_2 = 16$ kg,$v = 5.2$ km/h,其他参数见表1 和表2,计算双质量-弹簧模型不同阻尼背包负重净机械功,并与文献[1,6]试验结果对比,结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,模型计算结果与文献试验结果吻合。该计算模型表明,弹性悬挂负重与刚性连接负重相比,最小悬挂阻尼有利于减少弹性悬挂负重步行时每一步动力腿的净机械功,小的悬挂阻尼易于放大每一步行净机械功的差异,随着悬挂阻尼的减少,悬挂负重步行接近共振时能量消耗增加。

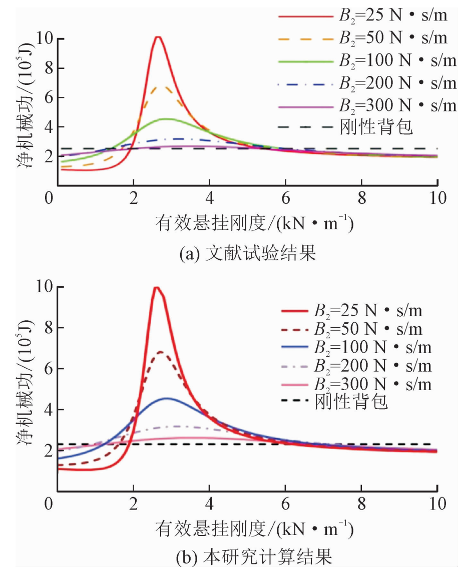


图 6 不同阻尼背包净机械功对比

Fig. 6 Comparison of mechanical work of knapsack with different damping

3.4 不同背包负重和步行速度净机械功

在背包悬挂阻尼 $B_2 = 100$ N · s/m,背包负重依次为 10 kg、15 kg、20 kg、25 kg、30 kg,步行速度为 3.7 km/h、4.5 km/h、5.2 km/h、6 km/h,其他参数见表 1 和表 2,采用双质量-弹簧模型计算不同背包负重和行走速度标准化净机械功,并与文献[1,6]对比,结果如图 7 和图 8 所示。

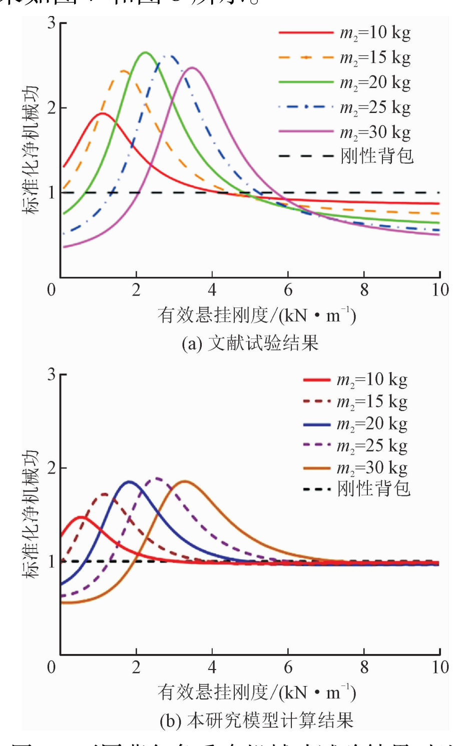


图 7 不同背包负重净机械功试验结果对比

Fig. 7 Comparison of mechanical work with different knapsack weight-bearing

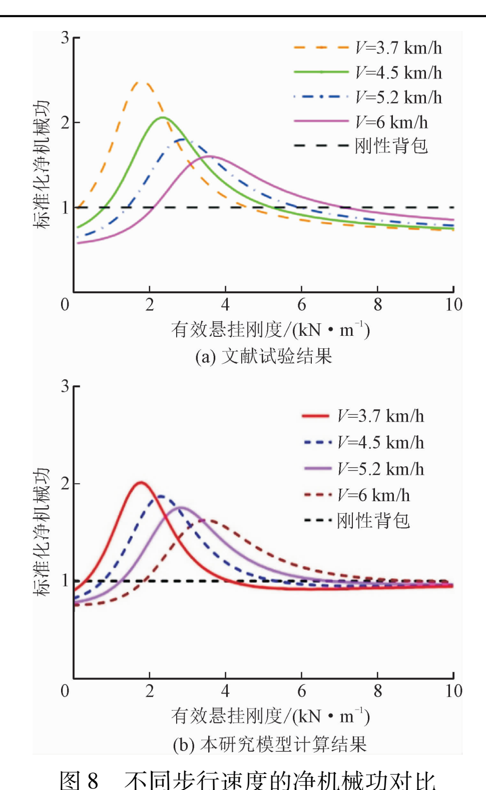


图 8　不同步行速度的净机械功对比

Fig. 8　Comparison of mechanical work with different walking speed

由图 7 和图 8 可以看出：模型计算结果与文献试验结果变化趋势吻合；步行速度 5.2 km/h，负重从 10 kg 增加到 30 kg 时，每一步小悬挂刚度值的最小净机械功相对于刚性悬挂背包是减少的。负重 16 kg，步行速度从 3.7 km/h 增加到 6 km/h 出现类似的趋势。悬挂负重接近步行共振频率时，净机械功呈增加趋势，刚性背包随着负重量增加，净机械功也呈增加趋势。然而，当负重 16 kg，不断增加步行速度，悬挂负重接近步行共振频率时，净机械功相对刚性悬挂背包趋于减少。

4　分析与讨论

模拟人体背包负重行走过程中的运动轨迹和特性，运用多体动力学知识和参数，建立二自由度人体运动动力学模型（双质量-弹簧模型），推导了人体背包行走过程的运动学方程。采用 Matlab 计算求解多目标优化模型的方法识别了模型参数。双质量-弹簧模型计算背包负重能量消耗阐明了以往试验研究中能量消耗的差异性，计算结果与试验结果差异基本吻合。该计算模型表明以往研究采用的参数及试验条件不同，其试验结果也不同。Rome 等[1] 研究报道不同悬挂刚度的能量消耗的趋势是减少的，而 Foissac 等[6] 的研究结果是增加的。其原因是负重悬挂刚度，悬挂背包刚度接近步行共振时能量消耗增加，悬挂背包刚度适宜时能量消耗减少[14]。双质量-弹簧计算模型表明两种结果都有可能，且悬挂参数与步行代谢消耗密切相关。这比 Ackerman 等双自由度模型计算结果要准确，弥补该模型计算背包负重与步行共振时能量消耗的偏差。

通常该模型预测，当负重悬挂背包的固有频率 ω_d 显著小于步行频率 ω_f 时，步行的能量消耗趋于减少。

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}\omega_f \tag{7}$$

在这种件下，悬挂负重起到隔振作用，将负重运动与身体运动隔离，因此，弹性悬挂负重背包是比较理想的负重背包，也是经常采用的背包[1]。此外，弹性背包接近或高于步行共振频率时会导致步行能量消耗增加[6]。选择悬挂背包固有频率远低于步行频率，是设计悬挂背包的通用原则。

悬挂负重行走速度越高能耗消耗越大[15]，速度比负重量对能量消耗影响更大，负重量越大往往会增加能量消耗[16-17]。这与背包固有频率和步行频率直接相关，较大的负重量降低了步行频率，较高的步行速度增加了步行频率。研究表明，在一定速度范围内，随着步行速度增加，步行能耗逐步增加[18-21]。当步行速度和负重量较高时，弹性悬挂背包负重与刚性背包负重相比，步行的能量消耗大不相同。然而，步行速度太慢，负重量太小，使用弹性悬挂背包负重与刚性背包负重相比，对能耗几乎没有影响。Rome 等[1] 研究发现，弹性悬挂背包与刚性背包负重（27 kg）和高速度（5.6 km/h）步行能量消耗相比大幅减少，与预测结果一致。这与郭启贵等[22] 研究结果吻合。Ren 等[3] 研究发现，小负重（10 kg）和低速度（4 km/h）步行能量消耗几乎没有差异。因此，在相对较高步行速度情况下，弹性悬挂背包负重能耗是最经济的。

5　结　论

1）背包负重量、步行速度和阻尼是影响能量消耗的重要因素，适宜的弹性背包能有效地减少阻尼、大负重、快速步行时的能量消耗。

2）双质量-弹簧模型能更好地拟合试验数据，使用该模型计算人类背包负重能量消耗与前人的试验

研究结果基本吻合或变化趋势一致，说明该模型建模方法合理，可用于人体背包负重行走能量消耗的计算。

参考文献

[1] ROME L C, FLYNN L, YOO T D. Rubber bands reduce the cost of carrying loads[J]. Nature, 2006, 444(7122): 1023-1024.

[2] ABE D, YANAGAWA K, NIIHATA S. Effects of load carriage, load position, and walking speed on energy cost of walking[J]. Applied ergonomics, 2004, 35(4): 329-335.

[3] REN L, JONES R K, HOWARD D. Dynamic analysis of load carriage biomechanics during level walking[J]. Journal of biomechanics, 2005, 38(4): 853-863.

[4] ACKERMAN J, SEIPEL J. A model of human walking energetics with an elastically-suspended load[J]. Journal of biomechanics, 2014, 47(8): 1922-1927.

[5] ACKERMAN J, SEIPEL J. Energy efficiency of legged robot locomotion with elastically suspended loads[J]. IEEE transactions on robotics, 2013, 29(2): 321-330.

[6] FOISSAC M, MILLET G Y, GEYSSANT A, et al. Characterization of the mechanical properties of backpacks and their influence on the energetics of walking[J]. Journal of biomechanics, 2009, 42(2): 125-130.

[7] HOOVER J, MEGUID S A. Performance assessment of the suspended-load backpack[J]. International journal of mechanics and materials in design, 2011, 7(2): 111-121.

[8] KINOSHITA H. Effects of different loads and carrying systems on selected biomechanical parameters describing walking gait[J]. Ergonomics, 1985, 28(9): 1347-1362.

[9] DONELAN J M, KRAM R, KUO A D. Mechanical work for step-to-step transitions is a major determinant of metabolic cost of human walking[J]. Journal of experimental biology, 2002, 205(23): 3717-3727.

[10] ACKERMAN J, SEIPEL J. Coupled-oscillator model of locomotion stability with elastically-suspended loads[C]//Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences. Washington DC: ASME, 2011: 199-205.

[11] SAUNDERS J, INMAN V T, EBERHART H D. The major determinants in normal and pathological gait[J]. The journal of bone and joint surgery, 1953, 35(3): 543-558.

[12] GRIEVE D W, GEAR R J. The relationships between length of stride, step frequency, time of swing and speed of walking for children and adults[J]. Ergonomics, 1966, 9(5): 379-399.

[13] ZHANG L, XU D, MAKHSOUS M. Stiffness and viscous damping of the human leg[C]//Proceedings of the 24th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics. Los Angeles, USA: ASB, 2000: 38-43.

[14] 何美婷. 20-30 岁男性场地负重行走能量消耗特征研究[D]. 北京:北京体育大学, 2017.

[15] 宋海燕, 张建国, 王珺, 等. 基于表面肌电的人体背部负重行走肌肉疲劳特性研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2016(3): 426-430. (SONG Haiyan, ZHANG Jianguo, WANG Jun, et al. Fatigue characteristics of weight-bearing walking muscle on human back based on surface electromyography[J]. Journal of biomedical engineering, 2016(3): 426-430(in Chinese)).

[16] 李文选, 汪济民, 吴绍棠. 负重行走热能消耗的预测[J]. 军事医学科学院院刊, 1987, 11(6): 453-456. (LI Wenxuan, WANG Jimin, WU Shaotang. Prediction of thermal energy consumption for weight-bearing walking[J]. Academy of Military Medical Sciences, 1987, 11(6): 453-456(in Chinese)).

[17] 王欢. 步行能量消耗特征的研究与应用[D]. 上海:上海体育学院, 2013.

[18] 马继政, 李巍, 韦海燕, 等. 军人负重 25 kg 不同速度行军 1 km 时能量消耗的变化[J]. 中国应用生理学杂志, 2015, 3(22): 275-277. (MA Jizheng, LI Wei, WEI Haiyan, et al. Changes in energy expenditure for military personnel carrying 25 kg and running at different speeds for 1 km[J]. Chinese journal of applied physiology, 2015, 3(22): 275-277(in Chinese)).

[19] 孙泊, 刘宇, 李海鹏. 跑台上走和跑能量消耗与运动速度的相关关系研究[J]. 体育科学, 2012, 32(9): 17-22. (SUN Po, LIU Yu, LI Haipeng. Study on the correlation between energy consumption and speed of treadmill walking and running[J]. Sport science, 2012, 32 (9): 17-22(in Chinese)).

[20] ROME L C. Generating electricity while walking with loads[J]. Science, 2005, 309(5741): 1725-1728.

[21] 邱凌. 青年男性负重蹬楼梯能量消耗特征的研究[D]. 北京:北京体育大学, 2018.

[22] 郭启贵. 不同载荷负重及携物形态下行走的生物力学分析[D]. 重庆:西南大学, 2018.

（编辑　黄崇亚）